

水素エネルギーシステムへの期待

石本 祐樹

(プロジェクト試験研究部
水素グループ 副部長)



1. 最近の水素への高い期待の理由

最近の水素への期待の高まりについて、「カーボンニュートラル」に起因する複数の理由が考えられます。

カーボンニュートラルを達成するには、原則的にすべての部門で対策を取る必要が生じ、対策の難しい部門でも導入が検討されています。また、一次エネルギー源を脱炭素するため、再エネの導入量が増加しますが、風力や太陽光は気象条件によって変動するため、エネルギー貯蔵技術としての水素およびエネルギーキャリアが求められる可能性があります。さらに、需要と供給のバランスから脱炭素できる資源が地域内で十分に調達できない場合は、地域外からの輸送技術としての水素およびエネルギーキャリアが求められます。

2. 水素のカーボンニュートラルへの寄与

カーボンニュートラルへの水素の寄与を一

言で表現すると、「水素が持つエネルギーの輸送・貯蔵の性質により、エネルギー分野、産業分野の様々な需要を直接・間接に脱炭素する」となります。

図1に水素サプライチェーンとそのカーボンニュートラルへの貢献を示します。エネルギー利用に起因する二酸化炭素(CO₂)排出を削減するには、エネルギーのサプライチェーンを通して発生するCO₂を削減する必要があります。水素は利用時にCO₂を排出しないため、製造・輸送時にCO₂を排出しないようにすることによりサプライチェーン全体でCO₂を排出しないようにすることができます。ただし、CO₂を利用して炭素を含む合成燃料を製造・利用する場合はこれから除かれます。また、水素のサプライチェーン構成する機器の製造・廃棄に伴うライフサイクルのCO₂排出を考慮することも必要ですが、社会全体のCO₂排出量が低下することでこのようなCO₂排出も低減していくと思われます。

図1に示すように水素のサプライチェーン

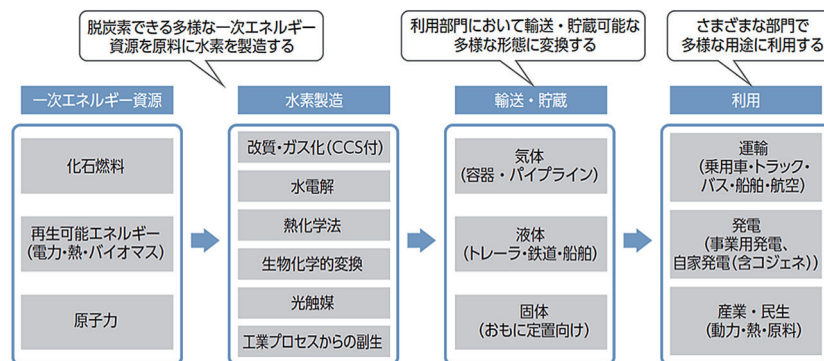


図1 水素サプライチェーンとそのカーボンニュートラルへの貢献⁽¹⁾

は、一次エネルギー、水素製造技術、貯蔵輸送技術、利用技術、輸送規模を組み合わせることで、新規なエネルギーのサプライチェーンの創出、または、現在のエネルギーのサプライチェーンを代替できる可能性があります。カーボンニュートラルの目標に対する水素への期待の高まりは、様々な分野を脱炭素できる多様性にも起因していると考えられます。

一方、この多様性のため、技術オプションの組み合わせの自由度が高く、関係するステークホルダーも多様であるため、水素導入を詳細に検討するとすぐに導入できる技術と社会実装までに時間が必要な技術が混在しています。この点が水素に対する期待と不安が交錯している一因であると考えられます。本稿では、水素のサプライチェーンの段階ごとにその特徴を述べ、続いて、サプライチェーン全体に影響する日本と世界の水素に関連した政策について述べます。

なお、水素エネルギーという言葉について、水素は二次エネルギーで一次エネルギー資源から変換するため、水素エネルギーという言葉は適切ではないと指摘される場合もあります。ここでは、水素のサプライチェーンがエネルギーを輸送・貯蔵するエネルギーシステムであると考え水素エネルギーという言葉を使うこととします。

3. 技術開発の方向性

水素は、石炭、石油、天然ガスなどの化石資源、水力、風力、太陽光などの再生可能エネルギー（再エネ）からの電力を用いた水の電気分解、発酵などによる生物化学的な水素製造、集光型の太陽熱や高温ガス炉という方式の原子炉からの熱を用いた熱化学法、太陽光と光触媒を用いて水を分解するなど様々な一次エネルギーから製造可能です。また、製品を生産する過程において、製品とは別に水素が発生する場合があります。これらを副生水素と呼んでいます。代表的な副生水素発生源は、水酸化ナトリウム（苛性ソーダ）の製造工程や、製鉄所のコークス製造工程です。副生水素の経済的な競争力は高い一方、副生品であるため、製造量は主製品の生産量に依存します。したがって、普及初期は、新規の設備導入が不要な副生水素や既存設備の設備利用率を上げるなどによって水素を製造することが経済的に有効と考えられます。中長期的には、カーボンニュートラル達成の要求から CO₂ 排出量制約や水素需要の増大が見込まれ、炭素回収・貯留（CCS：Carbon Capture and Storage）を行った化石燃料由来の水素、再エネ由来の水素への移行が必要となります。

図2に様々な水素製造技術の成熟度評価

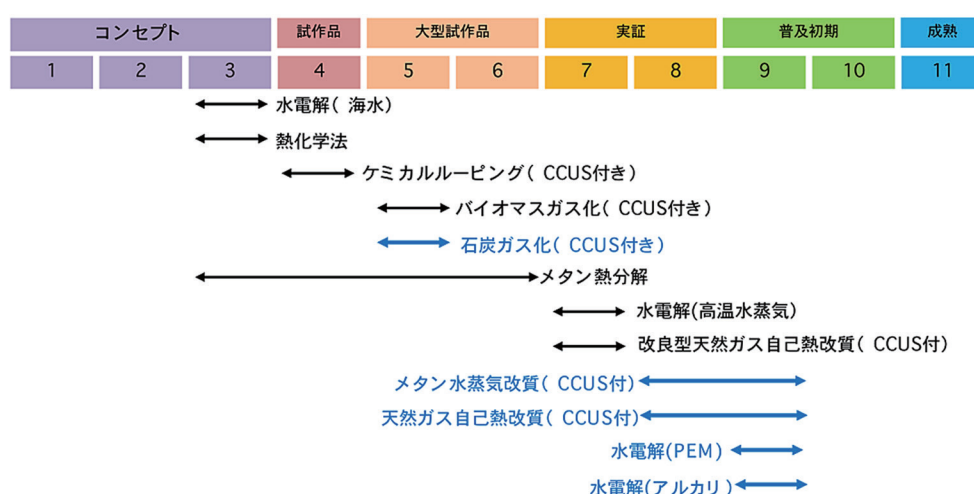


図2 水素の技術成熟度の分布⁽²⁾

(TRL : Technology Readiness Level) を示します。TRL は、NASA (米航空宇宙局) などが技術開発時に用いる指標として開発されたもので、実環境で利用できる技術レベルを TLR 9 として TRL 1 ~ 9 の 9 段階で表示することが多いですが、図の例は、普及も含めて 11 段階で整理しています。天然ガスの水蒸気改質や石炭ガス化による水素製造は、成熟技術ですが、CCS を備えた技術について実証から普及初期という評価になっています。また、アルカリ水電解は、産業分野では成熟技術ですが、エネルギー向けには大型化や低コスト化が必要ということから普及初期という評価をしていると思われます。政府・研究機関などの将来想定・分析では、図 2 で青色の矢印で示した CCS 付き化石燃料改質や水電解が量的な寄与をすると期待されています。しかし、利用可能な資源や水素製造規模など技術の多様性を考慮しますと、これらの技術のみに限定せず、TRL の比較的低い技術への投資も継続することが必要と考えられます。

図 3 に水素の色分けの例を示します。色分けの意図は、特定の原料や製造法の水素を市場で優遇もしくは排斥するためであると考えられます。色分けは、原料と製造水素あたりの CO₂ 排出量の組み合わせで行われることもあります。しかし、CO₂ 排出を計上する範囲と閾値には任意性があり、それがそれぞれの水素製造技術の評価や普及に及ぼす影響を注視することが重要です。評価指標は、水素の「よさ」をバランスよく示すことが求められ、水素の「よさ」を CO₂ 排出量に基づく色だけで評価するのはミスリードの可能性があります。水素を含んだエネルギー利用技術全体につい

て、温室効果ガスの排出量やその他の環境負荷を含む環境性、経済性、労働や健康といった社会性を含む総合的な評価が求められます。

4. 水素輸送・貯蔵技術

一般に物質を大量に輸送する場合、重量密度や体積密度の高い状態で輸送することが経済的です。水素を輸送する場合、圧縮することが簡便ですが、高い圧力では、水素の気体の性質が理想気体から外れていくため、圧力の増加分ほど密度が増加しなくなります。また、圧力に耐えるため、容器の肉厚が増加し、輸送の効率は徐々に低下します。そこで、水素の密度を高め、移送などの取り扱いが容易になるなどの利点があるため、水素を冷却や化学反応により液体にする輸送方法が開発されました。このような水素を輸送するための担体をエネルギーキャリアと呼びます。エネルギーキャリアに変換する場合、液化や化学反応の際の熱や電力の供給、設備が必要となり、用いる物質により特性が異なります。アンモニアや合成メタンは、水素に戻さず直接利用する場合も多いと想定されるため、本稿では、これらを「エネルギーキャリア」と呼んでいます。広義のエネルギーキャリアは、他の二次エネルギーを含む場合もあるので留意して下さい。

水素の輸送・貯蔵技術は、輸送距離や経路、輸送・貯蔵量、貯蔵期間、輸送先の需要技術により、適切な選択を行う必要があります。図 3 にモード別の水素およびエネルギーキャリアの輸送範囲を示します。本図で示す輸送範囲は、輸送方法の特性や経済性を考慮して



図3 水素の色分けの例 (3) (4)

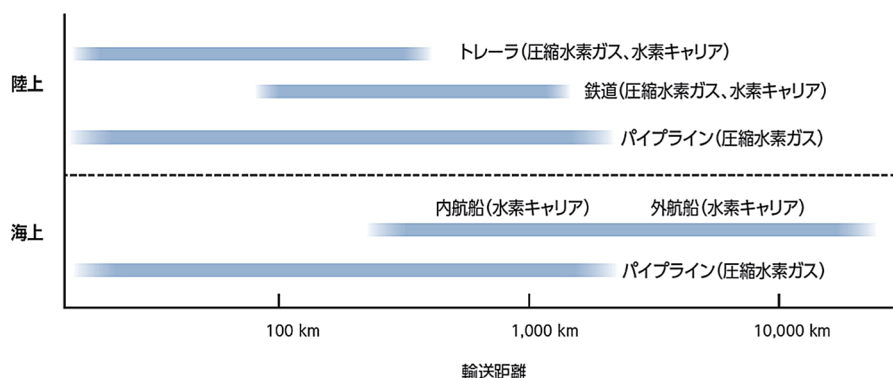


図4 モード別の水素およびエネルギーキャリアの輸送範囲⁽¹⁾

いますが、条件によっては、範囲外での適用も可能な場合もあるでしょう。陸上では、トラック、鉄道、パイプラインによる輸送が、海上では、船舶（内航船、外航船）とパイプラインによる輸送が可能です。当研究所の分析によれば、輸送距離の増加とともに経済的な輸送手段が、トレーラ、鉄道、船舶の順に変化していく結果を得ています。

輸送手段は、需要量や距離のほか、用途などを考慮して最適な輸送方法を選ぶことになります。また、輸送元と輸送先が長期間決まっている場合は、パイプラインも重要な選択肢です。さらに、輸送貯蔵技術に限りませんが、新たな水素関連機器の規制の最適化も重要な課題です。

図5に液体のエネルギーキャリアとして研究や実証が進められている液化水素、メチルシクロヘキサン（MCH）などの有機ハイドライド、アンモニア、メタン（合成メタン）の特徴を示します。これらエネルギーキャリア

の特性、各工程の技術的な成熟度は異なり、さらに用途や供給する条件によりエネルギーキャリアの優位性も変化するため、一般論としての「最適なキャリア」はなく、想定するサプライチェーンの条件を考慮して利用するエネルギーキャリアが選ばれることになるでしょう。また、輸入を想定する場合、チェーンの大型化や原料水素コストのさらなる低減も日本到着時の水素コスト低減に有効です。

図6にエネルギーキャリアを用いた水素の国際輸送の経済性分析結果を示します。主な分析条件は、日本への輸入水素量 25 億 m³N/年、設備利用率 90%，輸送距離 10,000km、日本側貯蔵日数使用量の 36 日分、プラント寿命 30 年、割引率 5%，2030 年を想定しています。図6に示すように、日本輸送時の水素コストに大きな差はなく、キャリアそれぞれにコストに寄与する部分が異なるため、重点的にコスト低減を検討する技術分野が異なることが分かります。また、海外で製造する水

圧縮水素	産業分野で多く用いられている水素の輸送形態。
液化水素 H ₂ (< 20K)	重量当たりエネルギー密度が高く、高純度水素が供給可能。 液化機の大規模化や高断熱の貯蔵タンク、タンカーの開発、低コスト化が必要。
メチルシクロヘキサン	常温、常圧で液体のため、貯蔵・輸送に既存の石油インフラが使用可能。 脱水素プロセスが吸熱反応のため、低反応温度化、安価な熱源の探索。
アンモニア	毒性があるが、国際貿易されている化学物質として管理されたプラント内では取り扱いの手段確立。 直接利用技術が実用化されれば、効率の向上が見込める。
メタン	CO ₂ と水素から合成、天然ガスの主成分で、既存インフラや機器が利用可能 CO ₂ の調達、メタネーション技術の大型化、利用後のCO ₂ の帰属などの制度設計などが課題

図5 エネルギーキャリアの特徴

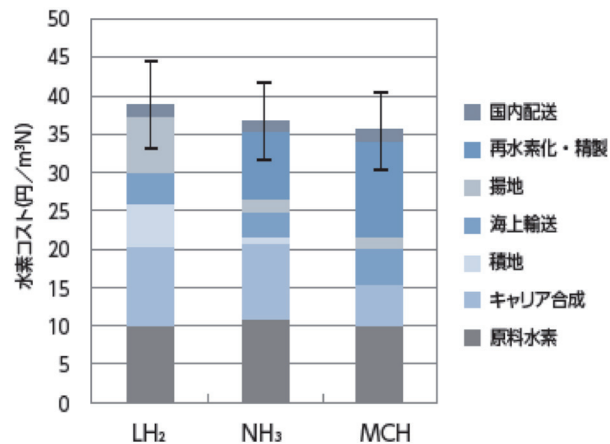


図6 エネルギーキャリアを用いた水素の国際輸送の経済性分析結果⁽⁵⁾

素は約9円/m³Nと安価な水準を想定していますが、さらなる水素コストの低減も日本到着時のコスト低減につながります。

5. 水素需要技術

世界全体の水素利用技術の量的ポテンシャルと市場シェアの分析例を図7に示します。それぞれの円の大きさが量的ポテンシャルを、横軸がそのセグメントでの潜在的な市場シェアを示しています。

水素の需要量が大きい技術は、発電、トラック、乗用車（小型・中大型）、業務用車両（バンなど）の燃料、高温の熱利用、ガス導管への注入、炭素有効利用（CCU）との組み合わせによるメタノールなどの製造、製油所、アンモニア・メタノール製造です。また、高い市場シェアが期待されるのは、アンモニア・

メタノール製造、製油所、フォークリフト、業務用車両（バンなど）です。多くの需要技術での利用が期待されるが、原料として水素を用いる場合を除いて、水素は動力・熱に変換して用いるため、バッテリーや代替燃料などとの競合が生じます。貯蔵量や輸送距離、需要技術の効率など、それぞれの特性により、ユーザーが水素または競合技術を選択するでしょう。また、国際エネルギー機関（IEA）の「エネルギー技術の展望2020」（ETP2020）⁽⁶⁾のSDS（Sustainable Development Scenario, 2070年カーボンニュートラル）においては、2050年に世界全体の電解水素、炭素回収・有効利用・貯留（CCUS）付きの化石燃料由来の水素製造量の割合は、それぞれ約50%で、水素需要量は、現在の3～4倍の規模となっています。

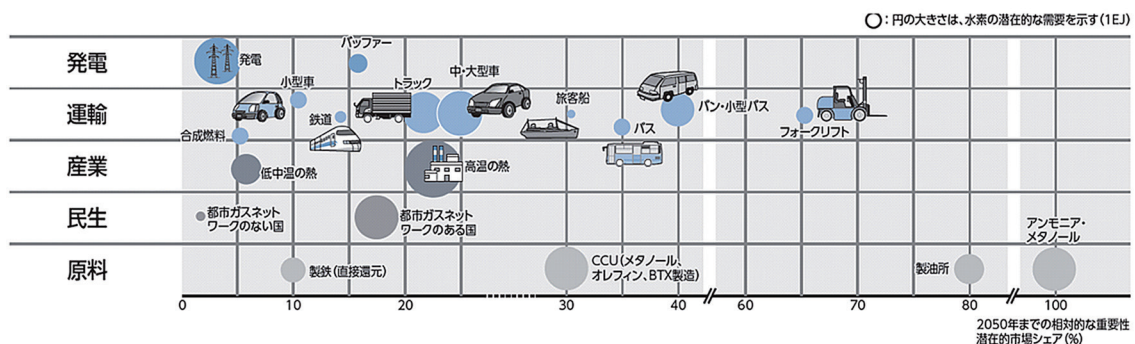


図7 世界全体の水素利用技術の量的ポテンシャルと市場シェアの分析例⁽⁷⁾

6. 各国の動向

日本における政府のプロジェクトによる大規模な水素・燃料電池の研究開発は、1978年のムーンライト計画とその後の「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発プロジェクト」(WE-NET: World Energy Network プロジェクト) に始まり現在に至っています。

2011年の東日本大震災とそれに伴う原子力発電所の事故により、日本における水素の位置づけが大きく変化しました。それまで水素は、燃料電池自動車を中心とした運輸部門やエネファームなど定置部門における利用が主に想定されていましたが、2014年のエネルギー基本計画において、水素を発電部門で大規模に利用することが言及されました。2020年12月の

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略⁽⁸⁾では、水素導入量について2030年最大300万トン、2050年2000万トンの目標値が設定されました。これら一連の水素関連政策の流れのうち、近年の概要を図8に示します。文書は、エネルギー政策を所管する経済産業省資源エネルギー庁の名前で作成されているものが多く、予算規模も大きいですが、省庁間にまたがる内容は内閣官房、大学や研究機関の基礎研究は文部科学省、道路や船舶、建物に関連する内容は国土交通省、CO₂削減の実証事業やCO₂削減量の評価手法開発などを環境省が行うなど、水素に関連するプロジェクトを実施する省庁の範囲は広いです。

図9に各国の水素政策の概要を示します。日米欧中を中心に世界各国で水素の戦略や

水素基本戦略：2017年12月 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議（内閣官房） - 政府全体の水素に関する取り組みの戦略 - 低コスト水素利用、国際水素サプライチェーン開発、国内再エネ導入拡大と地方創生、電力部門での利用、モビリティでの利用、産業利用、FC技術活用、革新的技術活用、他 - 導入目標と解釈できる数値が公表。
第5次エネルギー基本計画：2018年7月（エネ庁） 2050年に向けた日本のエネルギー需給の長期的なビジョンを示す。 - 再エネの主力電源化、調整力の脱炭素化、送電ネットワークの次世代化（送電事業効率化、投資、制度改革） - 水素社会実現に向けた取り組みの抜本強化
水素・燃料電池戦略ロードマップ：2019年3月改訂 水素・燃料電池戦略協議会（エネ庁） 2019年3月改訂、水素・燃料電池戦略協議会による文書。 - 水素戦略の目標を達成するための2025年、2030年の技術性能・コスト目標を設定、そのためのアクションプランを決定。有識者WGで分野ごとのフォローアップを実施（6月）。
水素燃料電池技術開発戦略：2019年9月 水素・燃料電池戦略協議会（エネ庁） ロードマップの目標を達成するため、6月の課題共有ウィークの議論に基づき、重点分野を抽出。
2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略：2020年12月 - 温暖化対策を「成長の機会」と捉える時代に突入したと認識 - 予算、税、規制改革・標準化、国際連携など、あらゆる政策を盛り込んだ実行計画を定めた14の重要分野に水素が含まれる。 2030年に水素導入量を最大300万トン（含むアンモニア）とすることを目指すなど高い目標。

図8 近年の日本の水素政策の流れ

 大規模に水素製造利用を推進 - 水素基本戦略等一連の政策文書が整備 - 海外からの輸入も想定し、FCV、水素ステーション導入、海外水素インフラ実証、Power to gasプロジェクト等を進める - グリーンイノベーション基金など大型政策	 水素は再エネ導入のための手段 2020年7月に水素戦略を発表 - HORIZON Europeで研究開発を推進。 - 再エネからの水素製造、産業・自動車以外の水素利用も盛んに検討 - 再エネ水素の「認証」など制度面も整備
 足元からの普及を重視 - 複数年計画で研究開発を実施、評価ツールの整備も実施 - フォークリフトなどニッチでも競争力がある機器の普及が進む。 - 自国資源による水素製造・利用（H2@Scale） - Earth Shotによる水素製造コストの大幅引き下げ計画（10年で1USD/kgを達成）	 国主導で産業育成・導入 - 第13期五か年計画で水素・燃料電池技術を明言 - 産業連盟による業界団体設立、ロードマップ作成 - 導入分野は運輸部門（バスや商用車）が中心 - 重点都市を指定して普及を競わせる

図9 各国の水素政策の概要

ロードマップが策定されています。また、資源国（豪州、カナダ、中東、南米）を中心とした低炭素水素の供給（輸出）に向けた動きも活発になっています。

7. まとめ

水素は、様々な脱炭素の一次エネルギー資源と多様なエネルギー需要技術を結ぶ媒体として、エネルギーシステムのカーボンニュートラルの達成に寄与することから、近年水素への期待が高まっています。その水素は二次エネルギーであり、様々な一次エネルギー資源から製造することができます。また、圧縮・液化などの状態変化や化学変化により輸送・貯蔵可能な状態・物質に変換し、多様な技術で利用可能です。本稿で述べた水素およびサプライチェーンの特徴から、水素は、エネルギーシステムをカーボンニュートラルとするための黒衣としての働きを担うと言ってよいでしょう。

参考文献

- (1) (一財)エネルギー総合工学研究所,『図解で分かるカーボンニュートラル』,技術評論社,2021年9月
- (2) <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>
- (3) The North American Council for Freight Efficiency, (<https://nacfe.org/emerging-technology/electric-trucks-2/making-sense-of-heavy-duty-hydrogen-fuel-cell-tractors/>)
- (4) CertifHy, <https://www.certifyhy.eu/>
- (5) 水野有智,石本祐樹,酒井奨,坂田興,「国際水素エネルギーキャリアチェーンの経済性分析」,エネルギー・資源,2017年5月
- (6) International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2020, (September 2020)
- (7) Hydrogen Council, "Hydrogen, Scaling Up" (2017)
- (8) 経済産業省,「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」,2020年12月